高硬度精密小形歯車のホブ切りに関する研究*

助 弘 毅**

Studies on Hobbing Small Precision Hard Gears

Tsuyoshi SUKEHIRO

The demand for the small precision gear used for many kinds of controlling mechanism and electric tools has recently increased so much. In order to obtain the small gears which run quietly and have durability, it is desirable to raise the gear cutting accuracy and to improve the surface durability by hardening the tooth surface. If it is possible to cut accurately with a hob the hardened and tempered gear blank, a great improvement in the gear production is attained. The experiments were made to confirm this possibility by using the suitable hob and hobbing machine; better results are obtained when Molybdenum (Mo) high speed steel M35 is used and the hob has a full radius tip. Other results in this study are as follows. The double start thread hob is preferable to the single start thread hob. The gear should be cut with low speed and high feed. Chloric oil is suitable for hobbing hard gears. The endurance and the cutting efficiency of the hob depend on the rigidity of the hobbing machine. The life of the hob can be increased if the MIKLON hobbing machine is reinforced and its vibration is decreased. By this way the small precision gear of $H_B=400$ can now be efficiently produced.

1. 緒 言

各種の制御機構，自動車，電動工具などに用いられる精密小形歯車は最近特に需要が増している。小さい容積で静粛に動力を伝達し，耐久力のある歯車を得るには，歯切精度をあげるとともに，歯面の硬度をあげ，面圧強度を高めたい。もし焼入調質してかたくした歯車材を立派にホブ切りすることができれば——近代ホブ盤とホブの進歩は目ざましく，精密にホブ切りすれば，ピッチのそろったしかも歯形の良い歯車を能率良く生産することが

できるのである——この歯切精度はそのまま保持され，面圧強度の高い歯車が，迅速に得られる。歯切り後の焼入硬化，それに伴う焼入ひずみの除去——心出し直し，歯研あるいはラッピングなど——精密歯車に仕上げんとするときには入念なる最高の精密工作技術が必要なのである。これに比してホブ切りですまされればどんなに助かることであろう。そのために本研究を行なったのである。

2. 実験に使用したホブ，歯車，ホブ盤の
要目ならびにフライホイール

電動工具の動力伝達に用いられている小形歯車を素材の状態で熱処理し，ブリネル硬度 $H_B=400$ とし，ミクロンホブ盤を使用してホブ切り実験を行なった。実験に

図 1 実験に使用したミクロンホブ盤

表 1

ホ	ブ	平	歯	車	ホブ盤の要目
モジュール	1.25	歯	数	44	ミクロン 102型
外 径	40	ピッチ円直径		55	切削しうる
孔 径	10	外 径		57.5	最大外径 110
圧 力 角	14 1/2°	歯 幅		50	最大長さ 130
切れ刃溝数	12	切 込 み		3.125	最大モジュール 2
軸 方 向 切 れ 刃 溝		ニッケルクロム鋼 (SNC 2)			ホブ軸回転数
右 巻		硬 度			205~666 rpm
条数 1 条および 2 条		焼 入 前	$H_B=200$		切削送り
進み角 1°59', 3°57'		熱処理後	$H_B=400$		0.13~0.9
材質 SKH 3, M35					mm/rev
					切削油 塩素化油

*原稿受付 昭和45年12月11日。精機学会九州支部講演会（昭和38年11月8日）にて発表。

**正 会 員 久留米工業高等専門学校（久留米市小森野町1232）

使用したホブならびに歯車、ホブ盤の要目を表1に示す。ホブは JIS B4355 に定められた小形歯車用ホブである。

高速度鋼 SKH3 のホブを用い、切削速度 $v=38$ m/min, ホブの送り $f=1.6$ mm/rev で表1の平歯車1個を削ると、切削に参加したほとんどすべての切れ刃に欠けを生じた。切削条件を $v=14$ m/min, $f=0.56$ mm/rev におとして歯切りしたのであるがやはりところどころに欠けを生じている。

そこでミクロンホブ盤を分解し、しゅう動部、軸受部を調整しなおした。特にホブ軸の遊び、歯車材回転軸の遊びはいてないにとった。しかしブリネル硬度 $H_B=400$ の高硬度歯車材を高速度鋼3種のホブ(刃先の硬度 $H_V=920$) で歯切りすれば、やはりホブの刃先に沢山の小さい欠けを生ずる。一般に高硬度歯車のホブ切りの際は振動を起こしやすいので、ホブ軸の回転振動を少しでも除くために図2のようにホブ軸に直接大きなフライホイールを取付けた*。この結果、ホブ軸の振動は減少し、ホブの欠けはほとんどなくなり、歯面の仕上がりもきれいになった。フライホイールが非常によく効いたのである。高硬度歯車材の切削には、ぜひ大きなフライホイールをつけたい。

3. 歯車材のかたさの影響

高速度鋼3種 (SKH3) のホブで熱処理前の歯車材 (Ni-Cr 鋼, $H_B=200$) と高硬度歯車材 (Ni-Cr 鋼, $H_B=400$) をホブ切りし、ホブの耐久力を比較した。切削油は塩素化油を使用した。切削条件はミクロンホブ盤で一般によく使用されている $v=38$ m/min, $f=0.56$ mm/rev とし、ホブの各切れ刃の二番面摩耗幅を測定比較した。ホブの切れ刃には図3右上のように創成中心の切れ刃を0とし、刃筋に沿って左に1, 2, 3……, 右方へ1, 2, 3……と番号をつけた。切れ刃中央の二番面摩耗を中央摩耗幅、刃先角部の摩耗を角摩耗幅とよぶことにする。熱処理前の歯車材 ($H_B=200$) 1個を削った後の中央摩耗幅の最大は0.025mm, 角摩耗幅の最大は0.07 mm である (図

3(A)). 同じ歯車素材を歯切り前に焼入れし、さらに調質してブリネル硬度 $H_B=400$ にした後に前とまったく同じ条件で歯車1個 (これは電動工用具用歯車5個分に相当する) を歯切りしたところ、ホブの切れ刃の二番面摩耗

図2 ホブ軸につけたフライホイール

図3 切削条件の変化とホブ各切れ刃の摩耗

* 現在市販のミクロンホブ盤 H102 型につけられているフライホイールは直径 100 mm, 幅 60 mm, 重さ 4 kg であるが, 本実験に使用したフライホイールは直径 250, 幅 35, 重さ 10 kg のものとした。

幅は図3(B)のようになった。大きなフライホイールをつけているために欠けはなく、無理をしないうで削れたのであるが、ホブの二番摩耗は焼入前のものに比べると非常に大きく、中央摩耗幅の最大は0.24 mm になった。これでは実用にならないので切削条件を下げて歯切りした。

4. 切削速度の影響

つぎにホブの送りは $f=0.56 \text{ mm/rev}$ に一定とし、切削速度を $v=38 \text{ m}$ から 21 m におとし、さらに $v=14 \text{ m}$ におとして歯切りした。その結果は図3(C)に示すように中央摩耗幅の最大が0.045 mm、角摩耗幅の最大が0.07と非常に大きく減少した。高硬度歯車の切削では、切削えだの影響が特に大きいので、切削速度をいろいろと変速て実験した結果は図4(a)のようになった。ただし送りは上げて $f=1.6 \text{ mm/rev}$ にした。図の太線が各切削速度における最大中央摩耗幅、破線が角摩耗幅である。切削速度は遅いほどホブの減耗は少ないのであるが、 14 m 以下ではあまり変わらないようである。また、切削速度 20 m を越えるとホブの摩耗は急速に増加する。

5. ホブの送りの影響

切削速度 $v=14 \text{ m}$ の低速一定とし、ホブの送り $f=0.5, 1.0, 1.2, 1.6, 1.8, 2.0 \text{ mm}$ と次第に大きくして歯切りした。図4(b)はそのときのホブの最大二番摩耗幅の変化を測定したものである。この実験ではホブの送りが 1.6 mm を越えると、ミクロンホブ盤は振動を起こし、ホブの摩耗は急速に増加した、軽切削用に設計されているこのミクロンホブ盤の頑丈さの限界をこしたためであろう。図3(D)は上記二つの実験によってみいだされた最適の条件でホブ切りしたときの各刃の二番摩耗である。最大中央摩耗幅0.025 mm、最大角摩耗幅は0.04 mmで(c)に示した $f=0.56 \text{ mm}$ の場合に比べ切削速度は同じ、送りは3倍である。3倍の能率で歯切りしたにもかかわらずホブの摩耗は減少した。振動を起こさぬ限り高送りがよいのである。

6. クライムホブ切り

クライムホブは普通ホブ切りに比して摩耗が少なくて有利である。図5は前の実験でホブの摩耗のもっとも少なかった

切削条件($v=14 \text{ m}$, $f=1.6 \text{ mm}$)で試験歯車材3個を削った後の各刃の二番摩耗幅を比較したものである。

7. 削りくずの理論的形状について

7.1 コンペンショナルホッピング

表1のホブおよび歯車についてまず普通ホブ切りするときの刃先部の働きを解析した²⁾。荒削りのときは刃先切れ刃で大部分の肉を削るのである。図6(A)はその説明図である。ホブの各刃の番号は前のとおり、一つの歯溝において、ホブの切れ刃は21, 20……12, 11……6, 5

図4 切削条件の影響

図5 普通ホブ切りとクライムホブ切りの比較

図6 削りくずの理論的形状

……の順に斜線を入れた部分の肉を削りとる。歯車材1回転後には f 送られて同じように削りとるのである。図の中で歯底線は各切れ刃の削る軌跡の包絡線となる。破線で示したのは歯車材1回転前の歯底線で、その間の斜線を入れている部分がいまの回転で削りとられるのである。1条ホブのときはホブ1回転ごとにつぎの歯溝を同じように削っていく。

一つの切れ刃がだす削りくずの断面は(B)図黒く塗りつぶしたものとなる。送りを2倍にすれば削りくずの長さ L は増すが、厚さ S はあまり変化がない*。ホブの働く切れ刃の数は増す。送りが2倍となるとホブの一つの切れ刃が歯車材を削る回数は $1/2$ となる。これがいまの場合平歯車を高送りで削ったとき摩耗が少なくなるおもな理由であろう。したがってホブ盤の鋼性が許す限り高送りのほうがホブの耐久力は増す。

7.2 クライムホッピング

図6(C)はクライムホッピングの場合の説明図である。一つの歯溝においてホブの切れ刃は16, 15……12, 11……6, 5……の順に斜線を入れた部分の肉を削りとる。(D)は6番切れ刃が削りとる削りくず1個の断面の形状を黒く塗って示したもので、クライムホッピングは普通ホブ切りに比べ削り始めの削りくずの厚さが早く厚くなり切れ刃が食込み始めにすべらないため摩耗も少ないのであろう。

* $m=1.25$ 1条ホブの送りを2倍にした場合、同じ切れ刃で削りくずを比較するとつぎのようになる。

$f=0.75$ mm/rev, 切れ刃 12 番,
 $L=4.9$ mm, $S=0.036$ mm,
 $S \times L=0.18$ mm²

$f=1.5$ mm/rev, 切れ刃 12 番,
 $L=8.5$ mm, $S=0.042$ mm,
 $S \times L=0.36$ mm²

7.3 送りを変えた場合の各切れ刃にかかる負担量の変化について

ホブの各切れ刃のだす削りくずの形状はそれぞれ異なり各刃の負担は様でない(図6(A)参照)。ホブの各刃にどのように負担がかかるかを知るために各刃の切削長さ L および削りくずの厚さ S を計算した。図7(A)の細線で示す L および S がその結果で1条ホブ、2条ホブともに切れ刃の切削長さ L はホブの創成中心近くが長くなっている。一方削りくずの厚さ S は創成中心からホブの食付部にいくにつれて厚くなっている。太い破線はその積($L \times S$)を示したもので、1条ホブを用いたときは21番切れ刃から切削が始まり、ホブの切れ刃にかかる負担がもっとも大きいのは12番切れ刃である。実際のホブ切りの場合この切れ刃が一番無理をするであろう。

図7(B)は送りを $f=0.5, 1.0, 1.6, 2.0, 2.8$ まで大きくした場合で最大の負担がかかる切れ刃はホブの創成中心から次第に遠ざかる。また2条ホブを用いれば、各刃のだす削りくずの厚さがほぼ2倍となり、ホブの切削負担量は約2倍である。2条ホブを使って能率よくホブ切りするためには、ホブならびにホブ盤がそれだけ頑丈なものを使用せねばならないことになる。

8. ホブの材質、形状について

高硬度歯車切削用のホブの材質については、舞いツ

図7 送りを変えた場合の各刃の負担量の変化

ルによるホブの耐久力試験の結果, Mo 系高速度鋼 M35 (C-W-Cr-V-Co-Mo, 0.8-6-4-2-5-5) が最高の成績を示している. そこで高硬度歯車切削用としてミクロンホブをこの材質で試作し(刃先硬度 $H_V=1008$) W系高速度鋼 SKH 3 のものと比較した. 図 8 は高硬度歯車用に試作したミクロンホブを示したものである.

図 5(C)は $H_B=400$ にかたくした 前と同じ試験歯車材 3 個を M35 のホブで歯切りした後, ホブの二番摩耗幅を測定した結果である. 中央摩耗幅 0.05 mm で, SKH 3 のホブのときの 0.09 mm に比べ減少している(図 5(a)参照). 実験に用いた ミクロンホブ盤では最適の切削条件で比較試験しているために両者ともホブにまったく欠けを生じなかった. つぎにホブのすくい角の影響を調べた. 6° のすくい角を与えた場合, ホブの摩耗にはあまり差がなかったが, ミクロンホブ盤の駆動モータの入力は, 平均 315 W ($\delta=0^\circ$) から 280 W ($\delta=6^\circ$) に減じ, 切り終りのかえりが少なくなる. また削りくずは流れ型の巻いたものとなるが, 実験中まれにホブの刃先に欠けを生じた. このような小形のホブで鋼を削るときは, すくい角は付けぬほうが安全であろう. 図 9 は刃先の角の丸みがそれぞれ異なるホブで同じ歯切り試験を行ない, 角の部を比較したもので, 角の R が小さいほど角摩耗が大きく, 特に丸みの境に稜線が残っているとそこがまず摩耗して二番面に沿って長く損傷しそれをもとに角の部の

図 8 歯直角断面の形状と寸法

図 9 ホブ刃先の角の丸み

図 10 ミクロンホブ盤での 1 条, 2 条ホブの摩耗

二番摩耗が大きくなる. 角の丸みはできるだけ大きくし, シングルアールにしたい. ホブの寿命はこの部で決まる.

9. 1 条ホブ, 2 条ホブの比較試験 (ホブ盤の剛性の影響)

図 10 は 2 条ミクロンホブを用い, 切削速度は 14 m/min に一定とし, ホブの送りを変えてそれぞれ歯車材 1 個を切った後のホブの最大二番摩耗幅を調べたものである. 細線は比較のために 1 条ミクロンホブの場合を示した. 歯切り能率は 1 条ホブの 2 倍であるがこのホブ盤では 2 条ホブで送り 1.2 mm を越せば振動は大きくなり, ホブの摩耗は増加した. 2 条ホブで 2.0 mm の高送りでは歯切りできなかった. ホブ盤の剛性が不足するためである.

そこでミクロンホブ 2 盤(テーブル径 120 mm 相当, 重量 0.6 t) に比べると 頑丈な汎用ホブ盤(荏藤製 KR-600, テーブル径 420 mm, 重量 2.4 t) で同じ試験歯車のホブ切りを行なった. 表 2 はホブならびにホブ盤の要目を示したもので, 使用したホブの歯形はミクロンホブとまったく同じもので, 材質は Mo 系高速度鋼 M35 相当材の YXM 3 (C-W-Cr-V-Co-Mo, 1.0-10-4-3-5-3)

表 2

汎用ホブ盤の要目		ギヤホブの要目	
KR-600 型		モジュール	1.25
切削しうる		外 径	50
最大外径	600	圧 力 角	$14^\circ 30'$
最大長さ	300	切れ刃溝数	12
最大モジュール	5	軸方向切れ刃溝	
切削送り		右 巻	
0.25~3.0 mm/rev		条 数	1 条, 2 条
切 削 油		進 み 角	$1^\circ 33' 3^\circ 06'$
塩素化油	32 l/min	材 質	YXM 3

である。前と同じくホブの送りをそれぞれ変えてホブ切りしたときのホブの最大二番摩耗幅を測定すると、1条ホブ、2条ホブとも送りが大きくなるにつれて摩耗は減少し、送り 2.0 mm をこせばふたたび増加する (図 12, 1 点鎖線は 2 条ギヤホブの摩耗を示す)——ミクロンホブ盤の場合は送り 1.6 mm 以上では摩耗が増加し、送り 2.0 mm 付近では振動を生じてまったく削れなかったのであるが、この場合の送り 2.0 mm はホブの摩耗のもっとも少ない最適の送りである——2 条ホブで 2 倍の能率で歯切りしてもホブの摩耗は 1 条ホブと大差ない。ホブ切りの能率を上げるためには頑丈なホブ盤が必要である。しかし汎用ホブ盤でモジュール 1.25 の小型歯車を切るのはホブ盤の容量が大きすぎ、テーブル周速が速くなり不利である。そこでミクロンホブ盤を頑丈に補強改造してホブ切り試験を試みた。

10. 頑丈に補強したミクロンホブ盤によるホブ切り実験

$H_B=400$ の高硬度歯車を 2 条ホブで歯切りしたときミクロンホブ盤のどの部分が弱いかを調べるためホブ盤各部の振動を $v=14$ m, $f=1.6$ mm で切削中に測定し

図 11 補強したミクロンホブ盤

た^{3),4)}。測定した場所は図 11 オーバアーム上(B)位置、ホブサドル上(C)、ホブ台上(D)、ホブ軸受部(E)でその結果を表 3 ①に示す。もっとも振動の大きいのはホブ軸受およびオーバアームの先端である。そこで図 11 に示すように、オーバアームとベッドを頑丈な 2 本のブレースでつないだ。片持ちであったホブ軸は先メタルをつけ軸の先端を受けた。また、ホブ台はサドルからだした固定片で切込量決定後固定し、サドルと 1 体とした。ギブも固めに調整した。一方、歯車材の取付けマンドリルを太くして、主軸に固定し、マスタホイールその他伝導歯車の遊びの影響を少なくするために、強さを加減できるブレーキをマンドリルにつけた。この補強によって振動は表 3 ②に示すように小さくなった。このように補強した後に、前と同じ歯切試験を行なった結果を図 12 に示す。黒丸太線がホブ盤補強後のホブ切りにおけるホブの最大二番摩耗幅を示したもので、高送りが可能となり、前の汎用ホブ盤で歯切りしたときに劣らない。表 4 はミクロンホブ盤を頑丈にした後の歯切精度を示したもので、ホブ切り精度にしてはよいほうであろう。しかし、図 11 のように主要部を全部補強したのでは生産工場では不便であろう。ホブ切りの能率を上げるためにどうしても剛

図 12 ミクロンホブ盤補強後の 2 条ホブの摩耗

表 3

① ホブ盤を頑丈にする前の振動 (単位 μ)

切削条件	2 条 $v=14$ m/min $f=1.6$ mm/rev				
測定位置	A	B	C	D	E
最大振 幅					
垂直方向	片持	20	4	6	4
水平方向	片持	9	6	8	25

② ホブ盤を頑丈にした後の振動 (単位 μ)

測定位置	A	B	C	D	E
最大振 幅					
垂直方向	4	3	3	4	3
水平方向	11	6	4	5	11

表 4

(単位 μ)

	ミクロンホブ盤		KR-600 ホブ盤		JIS 規格	
歯 切 法	普通 ホブ切り	クライム ホブ切り	普通 ホブ切り	普通 ホブ切り		
使用ホブ	1 条	1 条	1 条	2 条		
切削条件	$v=14$ $f=0.56$	$v=14$ $f=1.6$	$v=14$ $f=0.75$	$v=14$ $f=0.75$	特級	1 級
単一ピッチ誤差	3.5	4	1	2.5	4	6
隣接ピッチ誤差	4	5	2	3	4	6
累積ピッチ誤差	14	11	4	6	16	22
歯 形 誤 差	6	6	4	4	3	4

(ピッチの測定はカルツァイス社の歯車試験器、歯形の検査は)
(クリンゲンベルグ社のインボリュート歯形試験器を使用)

性の高い小形歯車用強力ホブ盤の必要性を痛感した次第である。

11. 結 び

高硬度の小形精密歯車をホブ切りする場合は、ホブ盤に振動を生じやすく、ホブの損耗もはなはだしい。ホブ盤を頑丈にし、十分遊びをとり、最適の切削条件でホブ切りすれば $H_B=400$ 程度のものは実用生産することができる。ホブの材質は M35 等の Mo 系高速度鋼とし、切削油は塩素化油を十分に注ぎ、低速、高送りの最適の切削条件を、使用するホブ盤についてみい出すこと。能率を上げるには 2 条ホブを用いること、ホブの刃先は大

きく丸め、ていねいに仕上げることなどが大切である。

終りに本研究を遂行するにあたり終始ご指導いただいた久留米工業高専校長和栗明先生、同教授相浦正人先生に厚くお礼を申し述べる。

参 考 文 献

- 1) 和栗, 相浦他: 舞いツールによるホブの耐久力試験, 久留米工専研究報告, No. 6 (1966) 10.
- 2) 和栗, 相浦: ホブの外周切れ刃の切削理論 (第1報), (第2報) 久留米工専研究報告, No. 9 (1968) 1.
- 3) 相浦, 助弘他: ホブ盤のビビリ振動防止に関する実験, 日本機械学会講演論文集, No. 192 (1968) 139.
- 4) 和栗, 助弘他: 高硬度小型歯車のホブ切り実験, 特に歯切盤の振動がホブの摩耗に及ぼす影響について, 日本機械学会前刷集, No. 112 (1964) 84.